



沈星,工学博士,南京航空航天大学教授,博士生导师,江苏省“青蓝工程”优秀青年骨干教师。担任航空学会结构强度分会副主任委员,江苏省工学1类研究生教育指导委员会秘书处负责人,江苏省国际化品牌专业(Aerospace Engineering)负责人,国家自然科学基金、航空科学基金、科技部重大基础研究项目函评专家及Smart Materials and Structures, Aerospace Science and Technology和《航空学报》等国内外著名期刊审稿人。

主要从事基于压电、形状记忆合金的航空智能结构优化设计、力学分析及其工程应用研究。主持完成了国家自然科学基金、航空科学基金、省自然科学基金、民机专项科研以及中航工业、航天科技集团及29基地等多个科研院所的国防型号项目的研究。在国内外核心期刊以及学术会议上发表论文近90篇,其中60余篇被SCI和EI收录,出版专著1部,授权发明专利10余件,获国家级教学、科研成果奖2项,省部级奖2项。

基于压电驱动器的风洞全模试验主动抑振研究进展

张磊,姜帅和,黄赟,章锐,王韬熹,沈星

(南京航空航天大学航空学院机械结构力学及控制国家重点实验室,210016 南京)

摘　要:风洞全模试验是验证飞行器气动性能的重要试验。悬臂支杆作为该类型试验中最普遍采用的支撑方式,具有结构简单、安装方便、支撑干扰低等优点,但也存在支撑刚度低、结构阻尼小等特征,导致易出现模型支撑系统的振动。在大型风洞和低温风洞中此现象发生得尤为频繁,甚至中断吹风过程。针对该问题,首先对风洞全模测力试验振动问题的历史发展及传统振动抑制方法进行回顾,接着对风洞全模测力试验的振动问题进行分析,然后介绍了国内外的基于压电的各类抑振原理及抑振结构型式,并对主动抑振算法的研究进行了综述,最后总结了抑振系统对气动系数的影响,并讨论了攻角扩展的相关结果。

关键词:压电;全模试验;主动抑振;气动弹性

中图分类号:V211.72　　**文献标志码:**A

收稿日期:2022-03-25　　**修回日期:**2022-06-14

基金项目:国家自然科学基金(No. 11872207);航空科学基金(No. 20180952007);江苏省自然科学基金(No. BK20200413);江苏高校优势学科建设工程项目;江苏省“双创博士”项目

通信作者:沈星,教授,博士生导师。E-mail:shenx@nuaa.edu.cn

引用格式:张磊,姜帅和,黄赟,等. 基于压电驱动器的风洞全模试验主动抑振研究进展[J]. 应用力学学报,2022,39(4):607-616.

ZHANG Lei,JIANG Shuaihe,HUANG Yun,et al. A review of active vibration control for full span models in wind tunnels based on piezoelectric actuators[J]. Chinese journal of applied mechanics,2022, 39(4):607-616.

A review of active vibration control for full span models in wind tunnels based on piezoelectric actuators

ZHANG Lei, JIANG Shuaihe, HUANG Yun, ZHANG Rui, WANG Taoxi, SHEN Xing

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 210016 Nanjing, China)

Abstract: The full span wind tunnel test is an important test for validating the aerodynamic performance of the aircraft. As the most commonly used support system, the cantilever sting has the advantages of simplicity in structure, convenience in assembly, and low support interference, but it also has the characteristics of small support stiffness and low structural damping, which is prone to the model support system vibration. This phenomenon happens frequently in large size and cryogenic wind tunnels and may give rise to an interruption of the polar. Aiming at this problem, this paper first reviews the historical development and traditional vibration suppression methods in full span wind tunnel tests. Then it analyzes the vibration problem of full span wind tunnel tests. Furthermore, various principles on the piezo-based vibration-suppression and corresponding structure configurations are introduced, and research at home and abroad on the active vibration control algorithms is reviewed. Last, the paper summarizes the influences of the vibration-suppression system on the aerodynamic coefficient and discusses the results regarding the expansion of the angle of attack.

Key words: piezoelectricity; full span test; active vibration control; aeroelasticity

风洞全模试验是飞行器研制过程中的重要测试项目。为减小支撑系统的气动干扰,风洞常常采用细长尾支杆的方式支撑模型以进行全模试验。但是,这种支撑方式也呈现出低刚度和小阻尼的动力学特性,模型及支撑系统会在靠近失速攻角时出现振动现象。这种振动将引起测试数据质量的降低和支杆的疲劳问题。当振动幅度过大时甚至可能导致模型和支杆面临强度破坏的风险,这不仅限制了风洞测试包线,而且增加了风洞试验的风险。

在风洞全模试验模型振动问题的研究过程中,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration,简称 NASA)首先对此类振动的成因进行了研究与分析[1-4]。Balakrishna 等[5]认为模型及支撑系统的振动主要由不稳定气动力引起。而不稳定作用力主要有以下几种。

1) 风洞内的湍流压力波动。此波动是动压的函数,以白噪声的形式作用在模型-天平-支杆上。

2)由湍流和模型尾流引起的模型振动。

3)由于机翼激波边界层相互作用和相关流动分离引起的抖振,此激励随迎角变化。

4)在高升力状态下,由俯仰扰动触发的悬臂支撑系统的弹性储能释放,导致支杆回弹。

在此基础上,研究人员又开始了风洞模型振动抑制方法的探索,先后对调谐质量阻尼器[6-7]、黏弹性材料[8-12]和电磁作动器[13-16]等展开研究。调谐质量阻尼器需要针对特定模型进行设计,不具备适应不同模型的能力,同时其在低频段难以设计。黏弹性材料降低结构振动主要依赖于材料剪切耗能,其高频抑振效果较好,而在大尺寸风洞中,模型的振动频率较低,因此抑振效果有限。此外,电磁作动器以惯性反作用力抑制结构振动,需要占用较大的模型内部空间,且相关实验结果显示,其抑振效果相对有限。

目前风洞模型振动抑制的主要研究方向是基于压电的振动抑制[17],其优点是不占用模型内部空间,不破坏模型-天平-支杆的原有外形,且具有很好的模型适应性。美欧已经成功研制了基于压电的模型振动抑制系统,并作为常规设备用于风洞试验中,而我国仍处在起步阶段。因此,有必要对风洞模型振动抑制的研究进行梳理与总结,从而加快国内模型主动抑振技术的研究与应用。

1 振动问题分析与抑振原理

1.1 振动问题分析

风洞中模型的振动问题本质上属于气动弹性力学问题,但区别于传统的飞行器气动弹性[18],其关注的是模型-天平-支杆整体的气动弹性。在此问题的研究中,通常将飞行器认为是一个(准)刚体,天平与支杆为弹性体,模型-天平-支杆整体在风洞中受到流体的作用,其组成如图1所示。

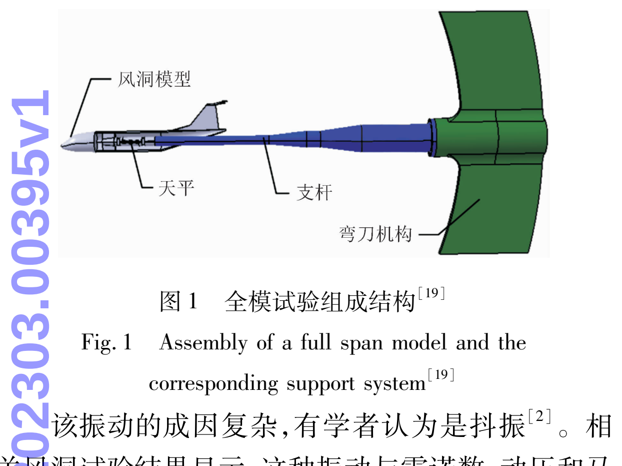


图1 全模试验组成结构[19]

Fig. 1 Assembly of a full span model and the corresponding support system[19]

该振动的成因复杂,有学者认为是抖振[2]。相关风洞试验结果显示,这种振动与雷诺数、动压和马赫数密切相关,而且常常发生在失速攻角附近。这种振动与特定的飞行器模型没有密切关系,不同布局的飞行器在风洞全模试验中都出现了该振动问题[3-4]。而且实验研究表明,由于结构阻尼随温度降低,在低温风洞中这种振动更为剧烈[20]。

地面实验结果显示,模型-天平-支杆的模态阻尼较小[21]。其主要模态有模型俯仰、偏航、滚转方向的支杆模态和模型俯仰、偏航方向的模型/天平模态以及轴向振动模态[2,19,21-22]。典型全模试验中的模型-天平-支杆的模态振型(模型)如图2所示,其对应的频率与阻尼如表1所示。

表1 实验模态分析结果[21]

Tab. 1 Results of experimental modal analysis[21]

编号	频率/Hz	阻尼比/%	模态信息
1	11.344	1.34	支杆偏航模态
2	12.524	0.74	支杆俯仰模态
3	27.846	3.02	滚转模态
4	41.962	1.45	天平偏航模态
5	56.887	0.98	天平俯仰模态

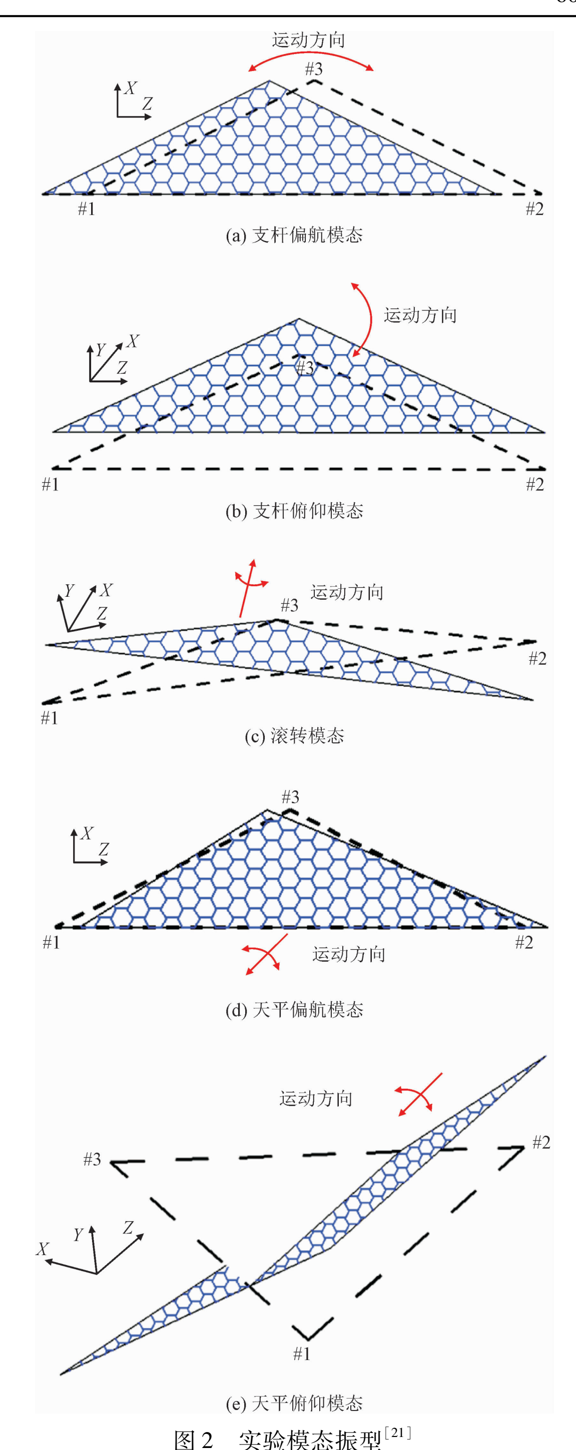


图2 实验模态振型[21]

Fig. 2 Experimental modal shapes[21]

1.2 抑振原理

风洞全模试验中模型出现振动现象的内在原因是模型-天平-支杆的阻尼较小[2,22-23]。因此,抑振的根本目标在于提高结构的阻尼。基于压电的主动抑振方法的基本原理是通过压电元件驱动结构做负功,从而主动耗散模型-天平-支杆的振动能量。其抑振原理如图3所示。

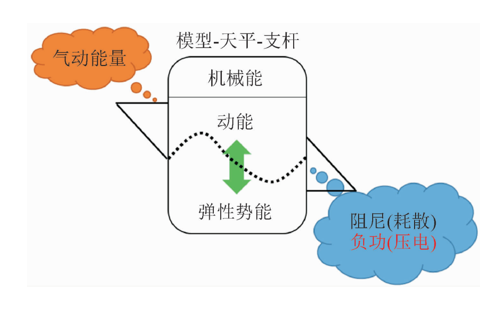


图 3　主动抑振基本原理

Fig. 3　Principle of active vibration control

2　抑振结构设计与研究

传感器与驱动器的选择及布置与风洞全模试验的抑振效果密切相关。抑振结构既要考虑传感器与驱动器的布局,又需要根据驱动器的布局位置对其内部结构进行针对性设计以满足各项约束及指标。

2.1　传感器

目前主要采用 2 种传感器测量全模试验中模型的振动,一种是加速度计[23-24],另一种是应变式测力天平[5,21,25-28]。加速度计的优势在于动态响应好,但需要针对每个模型确定加速度计的安装位置,而且占用支杆内部有限的走线空间。而内部测力天平的优点在于复用了力传感器的信号作为振动信号,不占用支杆内部走线空间,但由于应变信号同时接入了 2 套电气系统,经常会产生信号干扰的问题。2 种传感器的风洞测试信号如图 4 所示[29]。可以看出,加速度计信号不随模型攻角变化而产生静态值,而内部测力天平的应变信号随模型攻角变化产生相应的静态值。

此外,除了传统的加速度传感器、测力天平等,非接触测量等[7,30]新兴传感技术也逐渐被应用于风洞全模试验中。

2.2　压电驱动器布局及优化设计

压电驱动器的布局优化可追溯至 Lee 等[31]的研究,研究人员先后提出了诸如模态目标优化[32]、遗传算法[32-33]、多目标优化[33-34]、拓扑优化[35-36]等方法,取得了一定的成果。其中大部分研究都基于压电 d_{31} 效应,而风洞全模试验振动抑振研究主要基于压电 d_{33} 效应。此外,为避免布置压电驱动器对原有流场造成不利影响,压电驱动器应内嵌于支杆。这使得该问题上的压电器布局与优化设计区别于传统的研究。

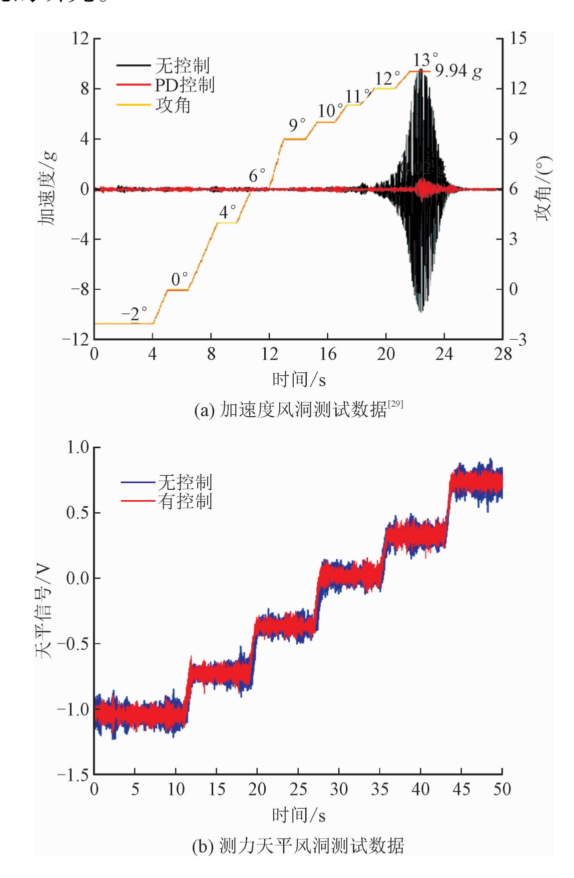


图 4　2 种传感器的风洞全模测试曲线

Fig. 4　Time history of two kinds of sensor in full span tests

在尺寸各异的风洞中,模型-天平-支杆的几何尺寸也各不相同,这也导致了压电驱动器的布局与优化设计迥异。目前,主流的抑振结构布局及型式主要由模型-天平-支杆的振动特征、抑振需求以及风洞的尺寸等因素决定。抑振结构安装位置以支杆根部为主,此外也包括天平与支杆之间和模型与天平之间。而压电叠堆在安装位置处的面内布局则以环形均布为主,其主要出于抑制多个方向的模型振动的考虑,而研究人员也研究了下置并列式布局,以抑制俯仰方向的振动。

欧洲跨声速风洞(European transonic windtunnel,ETW)[23,37-40]的研究人员首先开展了基于压电的风洞模型主动抑振研究。压电驱动器被放置于天平和支杆之间,14 个压电叠堆环形均布,分为上、下、左、右 4 个区,以抑制 5 个自由度的振动。针对俯仰一阶和二阶模态,上、下分区的压电驱动器反相控制;针对偏航一阶和二阶模态,左、右分区的压电驱动器反相控制;针对轴向模态,所有分区的压电驱

动器同相控制。其结构型式如图 5 所示。

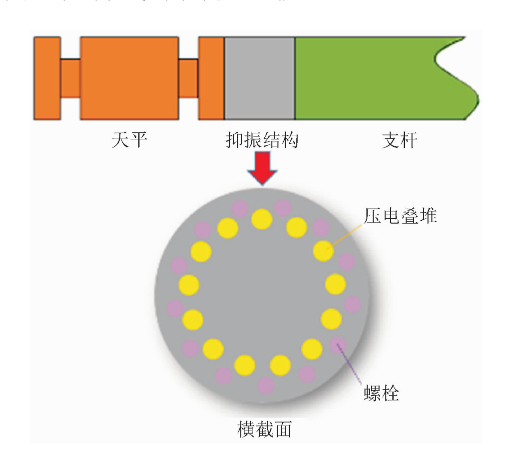


图 5　ETW 抑振原理图

Fig. 5　Schematic of AVC structure in ETW

美国 Balakrishna 等[5]提出了基于压电材料的主动支杆阻尼器,其将 4 个压电叠堆以十字型式环向布置于测力天平和支杆之间。2008 年,其又进行了深入研究[41],针对高升力体模型和细长体模型分别设计了 sting-tip 和 sting-root 主动抑振系统。其具体配置如图 6 所示。其中,sting-tip 主动抑振系统位于天平和支杆中间,4 个高压压电叠堆(单个最大输出力为 5 600 lb)环形均布,其截面布置型式见图 6(a)的截面配置 1。此设计方案适用于高升力模型。而 sting-root 主动抑振系统处于距离天平 10. 185 m 的整流罩内。4 个高压压电叠堆同样环形均布,其截面布置型式见图 6(a)的截面配置 2。此方案主要针对旋成体模型(如弹、运载火箭等),此类模型的气动力/力矩系数相对较小。

为进一步增强对高升力体模型的俯仰振动抑振能力,并实现对偏航方向振动的同步抑制,2014 年 Melissa 等[42]研究了面向公共研究模型(common research model,CRM)的 sting-root 主动抑振系统,采用 12 个最大输出力为 11 000 lb 的压电叠堆。压电叠堆采用环形布置,分为 4 个区,用于抑制俯仰和偏航方向的振动,如图 6(b)所示。

2016 年, 加拿大 Pereira [43]针对采用腹部单支杆的模型俯仰和滚转振动问题, 研究了一个内嵌压电叠堆的二自由度抑振结构, 其结构如图 7 所示。抑振结构安装在模型和天平之间, 2 个压电驱动器安装在 U 型框架之间, 两者同相驱动用于抑制俯仰方向的振动, 反相驱动用于抑制滚转方向的振动。

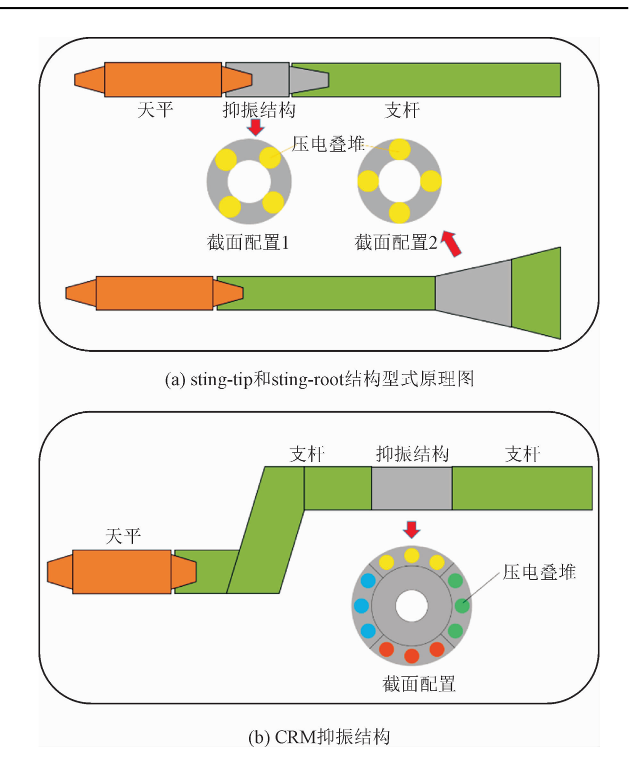


图 6　NASA 主动抑振结构

Fig. 6　AVC structures of NASA

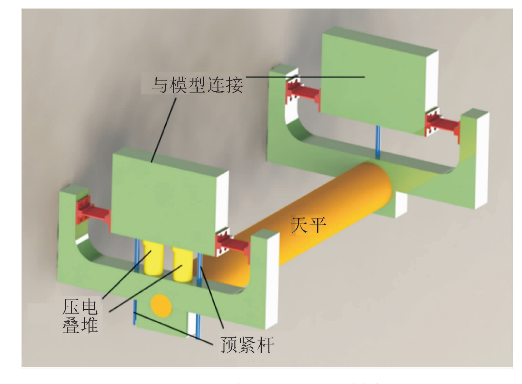


图 7　二自由度抑振结构

Fig. 7　AVC structures of two degrees

南京航空航天大学沈星等[25,44]先后研究了若干套抑振结构,其结构如图 8 所示。在研究低速风洞中模型俯仰方向的振动问题时,研究人员在支杆根部内嵌上下对称的压电叠堆,如图 8(a)所示。其又在研究跨声速风洞中模型俯仰振动问题时,在支杆根部内嵌下置并列式压电叠堆,并结合双柔性铰链设计,可同步抑制俯仰方向两个典型模态的振动,如图 8(b)所示。后在研究风洞模型多自由度振动问题时,在支杆根部环形均布 4 个压电叠堆,如图 8(c)所示。

大连理工大学的刘巍等[24,29,45-50]也提出了 2 种抑振结构,如图 9 所示。第一种方案采用了外套式抑振结构,整体结构外套于支杆上,4 个压电叠堆分

别安装在外套的 4 个腔内，外壳整体由两端的胀紧套胀紧在支杆上。后其又针对 1.2 m×1.2 m 跨声速风洞模型振动问题，在支杆根部设计了内置式 X 字型布局的抑振结构。

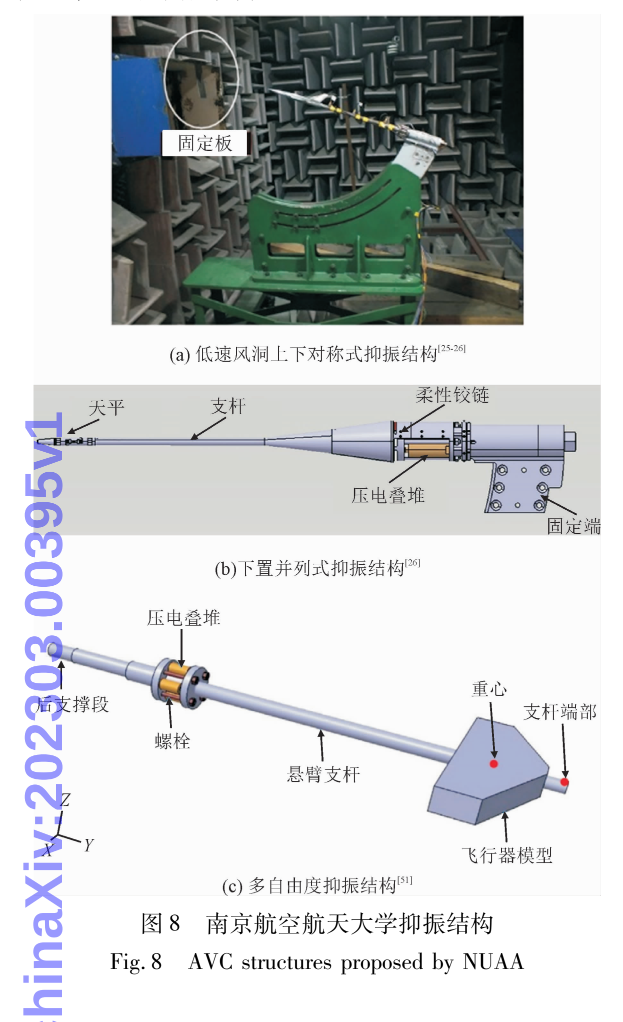


图 8　南京航空航天大学抑振结构

Fig. 8　AVC structures proposed by NUAA

3 主动抑振算法研究

从结构动力学视角出发，主动抑振的主要目标是提高模型及支撑系统的阻尼比。而在控制学科范畴内，主动抑振的本质则是扰动抑制。在主动抑振算法研究中，研究人员重点关注了比例-积分-微分(PID)与智能控制相结合的控制算法、最优控制、极点配置、自适应和鲁棒控制等方法[52]。

如 1.1 节所述，模型-天平-支杆整体存在多个柔性模态，而实际吹风过程中，往往只有少数几个模态的振动需要被抑制。研究人员研究了基于模型的控制方法，主要包括极点配置、正位置反馈控制、二次型控制等方法。文献[53]结合卡尔曼滤波研究了极点配置方法。该方法可直接实现预设的闭环系统性能，然而前提是系统必须完全状态可控。文献[54-56]研究了基于结构动力学物理特性的正位置反馈控制方法。该方法对溢出不敏感，同时具有衰减高频响应的优点。文献[49,57]设计了基于时滞补偿的线性二次型调节器(linear quadratic regulator, LQR)，实验结果表明固有频率处幅值谱衰减了 35%。文献[21]在实验建模的基础上结合独立模态空间方法和 LQR 实现了俯仰方向前两阶模态振动的同步独立抑振。其中，独立模态空间方法的优势在于设计人员可以自由选择被控模态。

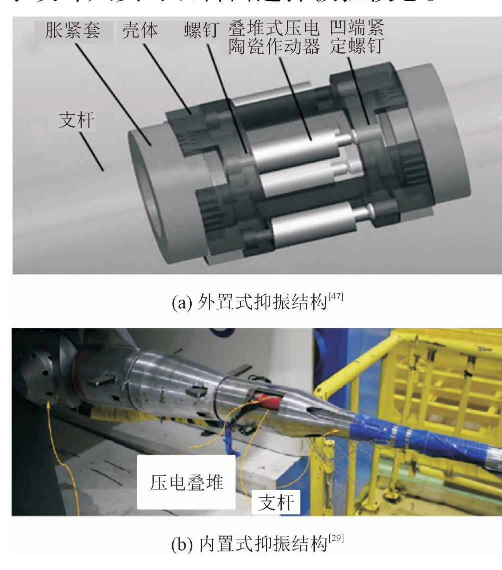


图 9　大连理工大学抑振结构

Fig. 9　AVC structures proposed by DLUT

在全模测力试验过程中，动压、马赫数、温度、气流扰动以及支撑结构整体动力学特征都在发生变化，难以用精确的数学模型进行准确表达。而被控对象及扰动的不确定性是主动抑振算法研究中的重点探索内容。其中，有两类典型的控制策略。一类是保持控制器不变，以降低闭环系统性能为代价，提高系统应对不确定性的能力。Fehren 等[23]研究了鲁棒控制方法以应对温度、动压和马赫数等因素的变化。文献[58]根据混合灵敏度指标，采用鲁棒 H_∞ 控制器，研究了压电柔性结构的振动抑制问题。文献[59]采用鲁棒增益规划方法研究了在不同位置、不同负载情况下的柔性连杆机构主动抑振。另一类是根据外部扰动和被控对象特征的变化，相应地改变控制器结构或参数，以保证闭环系统的性能鲁棒性。针对气动载荷、温度等因素的变化，研究人员将模糊算法、人工神经网络与 PID 相结合[25,28,45-47,60-61]，有效降低了尾支杆在不确定性因素影响下的振动水平。文献[62]采用 DC 增益模态排序方法对模型进行降阶，同时考虑整体动力学特征

的不确定性,对耦合速度反馈的模型参考自适应控制展开研究。文献[63]采用变结构与模型参考自适应结合的方法研究了大型柔性空间结构的主动控制。针对垂尾抖振过程中的时变参数摄动问题,文献[64]分析了控制系统中相位偏差的来源,包括附加滤波器、非并置执行器/传感器配置和硬件滞后,提出了自适应相位补偿器。

此外,研究人员还对含多自治子结构的分布式协同控制[65]、线性主动抗扰控制[66]、自适应前馈控制[67]等领域展开了相关研究。

4 气动系数对比及攻角扩展

基于压电驱动器的风洞全模主动抑振系统的根本目的在于降低风洞试验过程中模型及支撑系统的振动,其前提是引入的主动抑振系统不对气动系数产生影响。因此,对有无振动抑制系统下的气动力/力矩系数进行对比研究十分必要。

Balakrishna 等[5]在小型风洞中对主动抑振系统的气动力系数进行了对比验证,在动压为 35 psf 下的结果表明升力系数、阻力系数和力矩系数一致性良好,最大偏差低于 0.03。Acheson 和 Melissa 等[42,68]在对比了国家跨声速设施(national transonic facility,NTF)和艾姆斯 11 英尺跨声速风洞(ames 11-foot transonic wind tunnel,TWT)的具有统计意义的风洞数据后认为,在常温试验条件下,主动抑振系统对升力、阻力和俯仰力矩的重复性没有明显影响,同时能够在失速后获得气动数据。此外,低温高雷诺数风洞的数据也表明主动抑振系统对数据重复性的影响较小。余立等[22]在 $M=0.7$、总压 130 kPa 和自由转捩条件下,对比主动抑振系统开启与关闭下的气动系数的差异,相关结果表明其一致性均较好,最大偏差低于 0.012。

攻角扩展是主动抑振系统的另一个主要优势。一方面,在某些情况下模型在全模试验中在某些攻角振动较大,但跨过此阶段,振动则减弱。如果没有主动抑振系统,从试验安全的角度,通常会采用两端逼近,中间插值的方式,从而得到整个攻角测试范围的气动系数,这需要增加一次吹风过程;而在主动抑振的介入下,则可以一次对整个攻角测试范围进行完整的测量。此举既提高了试验效率,又降低了试验风险。另一方面,型号设计单位希望从风洞测试中得到更多的测试数据,作为设计验证的依据。主动抑振系统能够在高马赫数下实现攻角的扩展,得到原有测试无法获取的数据。

Melissa 等[42]在 NTF 的低温(总温 −250 ℉)跨声速($M=0.87$)风洞测试中,利用主动抑振系统把攻角测试极限从 5.6°提高到 7.8°,又在常温(总温 120 ℉)跨声速($M=0.87$)风洞测试中,将攻角从 5.8°扩展到了 11°。张磊等[21,27-28]在跨声速风洞测试中,针对某模型,在 $M=0.4$ 下实现了 6°的攻角扩展,其又针对另一模型,在 $M=0.7$ 和 $M=0.8$ 下分别实现了 0.5°和 1°的攻角扩展。刘巍等[24,29,69]在跨声速风洞测试中,在 $M=0.6$ 和 $M=0.7$ 下分别实现了 7°和 5°的攻角扩展。

5 结束语

大型先进风洞对获取飞行器全面的试验数据,加快飞行器研制进度具有重要作用,可大幅提高我国先进飞行器的国际竞争力,强力支撑并推动我国航空航天技术的持续创新发展。其中,基于压电的风洞全模试验模型振动抑制系统能有力抑制模型及支撑系统在吹风过程中的振动,并能实现扩展试验包线、加快试验进程、提升试验安全、降低能源消耗等目标,是大型先进风洞建设过程中的重要组成部分。本研究对基于压电的风洞全模试验模型振动抑制的相关研究内容进行了梳理,总结出如下几点供相关研究人员参考。

1)不同的风洞、天平、支杆以及抑振需求对基于压电的抑振结构提出了不同的要求。目前,面向横向振动的抑振结构研究较为成熟,而面向轴向和滚转振动的抑振结构研究则较少。

2)控制算法研究不再局限于单模态控制,而是向多模态、宽温域、多位置协同控制等方面进一步发展。此外,考虑到模型适应性需求,抑振系统的快速辨识与控制系统综合自动化方法可能成为控制算法研究的新方向。

3)由于模型-天平-支杆的整体阻尼随着温度的降低而降低,这导致在吹风过程中的振动更为剧烈。而压电的输出性能也随温度降低而衰减,这又限制了压电驱动系统的抑振能力。因此,低温环境下压电抑振系统的特性、低温环境下压电抑振能力的提升[70]有待进一步研究和突破。

参考文献:

[1] BRANDON J M,SHAH G H. Unsteady aerodynamic characteristics

of a fighter model undergoing large-amplitude at pitching motions-high angles of attack[C]//Proceedings of the 28th Aerospace Sciences Meeting. Reno:AIAA,1990.

[2] YOUNG J C, HERGERT D, BUTLER T, et al. Buffet test in the National Transonic Facility[C]//Proceedings of the 17th Aerospace Ground Testing Conference. Nashville:AIAA,1992.

[3] BUEHRLE R, YOUNG J C, BALAKRISHNA S, et al. Experimental study of dynamic interaction between model support structure and a high speed research model in the National Transonic Facility[C]//Proceedings of the 35th Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Hilton Head:AIAA,1994.

[4] YOUNG C, POPERNACK T, GLOSS B. National Transonic Facility model and model support vibration problems[C]//Proceedings of the 16th Aerodynamic Ground Testing Conference. Seattle:AIAA,1990.

[5] BALAKRISHNA S, HOULDEN H, BUTLER D, et al. Development of a wind tunnel active vibration reduction system[C]//Proceedings of the 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno:AIAA,2007.

[6] IGOE W B, CAPONE F T. Reduction of wind-tunnel-model vibration by means of a tuned damped vibration absorber installed in the model:NASA TMX-1606 [R]. Hampton:NASA,1968.

[7] 高大鹏. 基于调谐质量阻尼器的大型低速风洞试验模型减振研究[D]. 绵阳:西南科技大学,2019.

[8] GLAESE R, BALES G, HSU S, et al. Reduction of dynamic response of a wind tunnel sting mount using a hub damper unit [C]//Proceedings of the 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Orlando:AIAA,2010.

[9] PAN Jiahao, LIU Zhanqiang, KOU Xiping, et al. Constrained layer damping treatment of a model support sting[J]. Chinese journal of aeronautics,2021,34(8):58-64.

[10] 卜杨. 约束阻尼型风洞支杆设计与减振性能研究[D]. 济南:山东大学,2019.

[11] 潘家豪. 约束阻尼风洞支杆的优化设计与分析验证[D]. 济南:山东大学,2020.

[12] HSU S, MOR M, STIRLING B, et al. Reduction of dynamic response of a wind tunnel sting mount using co-cured composite and viscoelastic materials[C]//Proceedings of the 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Orlando:AIAA,2010.

[13] 陈卫东,邵敏强,杨兴华,等. 跨声速风洞测力模型主动减振系统的试验研究[J]. 振动工程学报,2007(1):91-96.
CHEN Weidong, SHAO Minqiang, YANG Xinghua, et al. Experimental evaluation of an active vibration control system for wind tunnel aerodynamic models[J]. Journal of vibration engineering,2007(1):91-96(in Chinese).

[14] 邵敏强. 复杂激励环境下分布式结构的振动主动控制研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2012.

[15] 邵敏强,陈卫东,徐庆华. 基于 PID 控制方法的模糊变增益振动主动控制试验研究[J]. 南京航空航天大学学报,2012,44(1):20-24.
SHAO Minqiang, CHEN Weidong, XU Qinghua. Experimental analysis of active vibration control based on PID method with variable fuzzy gain[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2012,44(1):20-24(in Chinese).

[16] 佘重禧,陈卫东,邵敏强. 跨声速风洞测力模型的降阶及 H∞ 减振控制[J]. 噪声与振动控制,2014,34(1):67-71.
SHE Chongxi, CHEN Weidong, SHAO Minqiang. Model reduction and active vibration suppression of a wind tunnel test model by H∞ control[J]. Noise and vibration control,2014,34(1):67-71(in Chinese).

[17] SHEN Xing, HUANG Yun, ZHANG Lei, et al. Piezoelectric vibration control in wind tunnel tests[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2021,38(3):437-449.

[18] RODNEN W P. 气动弹性力学理论与计算[M]. 北京:航空工业出版社,2014.

[19] 曾开春,寇西平,杨兴华,等. 跨声速风洞试验模型主动减振结构优化设计[J]. 航空学报,2022,43(2):224944.
ZENG Kaichun, KOU Xiping, YANG Xinghua1, et al. Optimization of active vibration damping structure for transonic wind tunnel test model[J]. Acta aeronautica et astronautica Sinica,2022,43(2):224944 (in Chinese).

[20] YOUNG C P, BUEHRLE R D. Structural damping studies at cryogenic temperatures:NASA-TM-109073[R]. Hampton:NASA,1994.

[21] ZHANG Lei, DAI Yuke, SHEN Xing, et al. Research on an active pitching damper for transonic wind tunnel tests[J]. Aerospace science and technology,2019,94:105364.

[22] 余立,杨兴华,寇西平,等. 跨声速风洞模型主动减振系统试验研究[J]. 南京航空航天大学学报,2019,51(4):526-533.
YU Li, YANG Xinghua, KOU Xiping, et al. Experiment on active vibration reduction system for transonic wind tunnel model[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2019,51(4):526-533(in Chinese).

[23] FEHREN H, GNAUERT U, WIMMEL R. Validation testing with the active damping system in the European transonic windtunnel [C]//Proceedings of the 39th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. Reno:AIAA,2001.

[24] LIU Wei, ZHOU Mengde, WEN Zhenquan, et al. An active damping vibration control system for wind tunnel models[J]. Chinese journal of aeronautics,2019,32(9):2109-2120.

[25] CHEN Jinjin, SHEN Xing, TU Fanfan, et al. Experimental research on an active sting damper in a low speed acoustic wind tunnel[J]. Shock snd vibration,2014,2014:524351.

[26] SHEN Xing, DAI Yuke, CHEN Mingxuan, et al. Active vibration control of the sting used in wind tunnel: Comparison of three control algorithms[J]. Shock and vibration, 2018, 2018: 1905049.

[27] DAI Yuke, SHEN Xing, ZHANG Lei, et al. System identification and experiment evaluation of a piezoelectric-based sting damper in a transonic wind tunnel[J]. Review of scientific instruments, 2019, 90(7): 075102.

[28] DAI Yuke, ZHANG Lei, ZHAO Zhenping, et al. Wind-tunnel evaluation for an active sting damper using multimodal neural networks [J]. AIAA journal, 2020, 58(5): 1939-1948.

[29] LIU Wei, LIU Weixiao, ZHOU Mengde, et al. An active vibration control method based on energy-fuzzy for cantilever structures excited by aerodynamic loads[J]. Chinese journal of aeronautics, 2021, 34(9): 224-235.

[30] 姜雨丰, 温正权, 姚壮, 等. 基于视觉的风洞支杆主动抑振方法[J]. 新技术新工艺, 2019 (6): 67-70.
JIANG Yufeng, WEN Zhengquan, YAO Zhuang, et al. Method of the supporting sting in wind tunnel based on vision active vibration suppression[J]. New technology & new process, 2019 (6): 67-70 (in Chinese).

[31] LEE C K, MOON F C. Modal sensors/actuators[J]. Journal of applied mechanics, 1990, 57(2): 434-441.

[32] RAMESH K K, NARAYANAN S. The optimal location of piezoelectric actuators and sensors for vibration control of plates [J]. Smart materials and structures, 2007, 16(6): 2680-2691.

[33] DHURI K D, SESHU P. Multi-objective optimization of piezo actuator placement and sizing using genetic algorithm [J]. Journal of sound and vibration, 2009, 323(3/5): 495-514.

[34] PADULA S L, KINCAID R K. Optimization strategies for sensors and actuator placement: TM-1999-209126 [R]. Virginia: NASA, 1999.

[35] DONOSO A, SIGMUND O. Topology optimization of piezo modal transducers with null-polarity phases[J]. Structural and multidisciplinary optimization, 2016, 53(2): 193-203.

[36] DONOSO A, BELLIDO J C. Systematic design of distributed piezoelectric modal sensors/actuators for rectangular plates by optimizing the polarization profile[J]. Structural and multidisciplinary optimization, 2009, 38(4): 347-356.

[37] SCHIMANSKI D, QUEST J. Tools and techniques for high reynolds number testing status and recent improvements at ETW[C]//Proceedings of the 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno: AIAA, 2003.

[38] SÖTSCH G. The new anti vibration system[N/OL]. ETW News, 2004-12-02 (12) [2022-05-02]. https://www.etw.de/publications/newsletters

[39] WIMMEL R. Active electronic equipment 6 DOF suspension for high loads as vibration, shock and quasi static forces[C]//European Conference on Spacecraft Structures, Materials & Mechanical Testing. Noordwijk: European Space Agency, 2005.

[40] SÖTSCH G. Further news: performance improvements [N/OL]. ETW News, 2012-11-23(17)[2022-05-02]. https://www.etw.de/publications/newsletters

[41] BALAKRISHNA S, BUTLER D H, WHITE R, et al. Active damping of sting vibrations in transonic wind tunnel testing[C]//Proceedings of the 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno: AIAA, 2008.

[42] RIVERS M B, BALAKRISHNA S. NASA Common research model test envelope extension with active sting damping at NTF [C]// Proceedings of the 32nd AIAA Applied Aerodynamics Conference. Atlanta: AIAA, 2014.

[43] PEREIRA J L. Development of an active damping system for use with a single strut mount[C]//Proceedings of the 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting. San Diego: AIAA, 2016.

[44] 沈星, 涂凡凡, 陈金金, 等. 风洞悬臂杆结构主动减振系统的研究[J]. 振动. 测试与诊断, 2014(3): 414-419.
SHEN Xing, TU Fanfan, CHEN Jinjin, et al. Study of active damping system for the cantilever sting in wind tunnel based on piezoelectric actuators[J]. Journal of vibration, measurement & diagnosis, 2014(3): 414-419 (in Chinese).

[45] 姜尔东. 支杆式风洞模型主动振动抑制方法与实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.

[46] 刘伟国. 支杆式风洞模型主动振动抑制控制方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.

[47] 刘巍, 毕晓丹, 贾振元, 等. 风洞模型主动抑振器的设计与实验[J]. 光学精密工程, 2015, 23(10): 2895-2901.
LIU Wei, BI Xiaodan, JIA Zhenyuan, et al. Design and experiment on active damper of wind-tunnel model[J]. Optics and precision engineering, 2015, 23(10): 2895-2901 (in Chinese).

[48] 鲁继文. 风洞模型支杆系统设计及振动主动控制[D]. 大连市: 大连理工大学, 2018.

[49] 张家昆, 贾振元, 刘昱, 等. 基于时滞 LQR 算法的风洞模型振动控制试验研究[J]. 新技术新工艺, 2018(9): 32-37.
ZHANG Jiakun, JIA Zhenyuan, LIU Yu, et al. Research on experiment of vibration control of wind tunnel model based on time-delay LQR algorithm[J]. New technology & new process, 2018(9): 32-37 (in Chinese).

[50] ZHOU Mengde, LIU Wei, WANG Qinqin, et al. A decoupled unified observation method of stochastic multidimensional vibration for wind tunnel models[J]. Sensors, 2020, 20(17): 4694.

[51] YU Yi, SHEN Xing, HUANG Yun. Multidimensional system identification and active vibration control of a piezoelectric-based sting system used in wind tunnel [J]. Shock and vibration, 2020,

2020:8856084.

[52] 韩江,乔印虎,张春燕,等.智能风力机叶片振动主动控制研究综述[J].应用力学学报,2015,32(3):446-453.
HAN Jiang,QIAO Yinhu,ZHANG Chunyan,et al. The review for elastomer smart active wind turbine blade vibration control[J]. Chinese journal of applied mechanics,2015,32(3):446-453(in Chinese).

[53] 韦亚南.时滞加速度反馈下风洞测力试验模型的振动主动控制[D].南京:南京航空航天大学,2015.

[54] FANSON J L,CAUGHEY T K. Positive position feedback control for large space structures[J]. AIAA journal,1990,28(4):717-724.

[55] SONG G,SCHMIDT S P,AGRAWAL B N. Experimental robustness study of positive position feedback control for active vibration suppression[J]. Journal of guidance,control,and dynamics,2002,25(1):179-182.

[56] OMIDI E,MAHMOODI S N,SHEPARD W S. Vibration reduction in aerospace structures via an optimized modified positive velocity feedback control[J]. Aerospace science and technology,2015,45:408-415.

[57] 张家昆.基于时滞与模糊滑模的风洞模型振动控制研究[D].大连:大连理工大学,2018.

[58] ZHU Xiaojin,LIU Jinsong,HUANG Quanzhen,et al. Robust H∞ control in active vibration control of piezoelectric smart structure[C]//Proceedings of the Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments. Beijing:IEEE,2009.

[59] STEPHAN A,RALF K,MICHAEL R,et al. Applied robust control for vibration suppression in parallel robots[C]//Proceedings of the 22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction. Ferrara:International Association for Automation and Robotics in Construction,2005.

[60] 张文博,陈明绚,沈星.基于神经网络的风洞尾支杆减振系统[J].南京航空航天大学学报,2018,50(2):276-281.
ZHANG Wenbo,CHEN Mingxuan,SHEN Xing. Damping system for sting used in wind tunnel based on neural network[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2018,50(2):276-281(in Chinese).

[61] 陈万华,王元兴,沈星,等.压电叠堆主动减振的神经网络 PID 实时控制[J].南京航空航天大学学报,2014,46(4):587-593.
CHEN Wanhua,WANG Yuanxing,SHEN Xing,et al. Neural network PID real-time control for active vibration reduction using piezoceramics stacks[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2014,46(4):587-593(in Chinese).

[62] 赵寿根,何玉金,李东海,等.基于模型参考自适应控制方法的风洞尾支杆振动主动控制[J].应用力学学报,2020,37(4):1450-1458.
ZHAO Shougen,HE Yujin,LI Donghai,et al. Active vibration control for wind tunnel model with sting support based on model reference adaptive control[J]. Chinese journal of applied mechanics,2020,37(4):1450-1458(in Chinese).

[63] 周军,陈新海.大型柔性空间结构的变结构模型参考自适应控制[J].航空学报,1992,13(4):158-163.
ZHOU Jun,CHEN Xinhai. The variable structure model refrence adaptive control for large flexible space structure[J]. Acta aeronautica et astronautica Sinica,1992,13(4):158-163(in Chinese).

[64] NIU Wenchao,LI Bing. Adaptive phase compensator for vibration suppression of structures with parameter perturbation[J]. Aerospace science and technology,2019,93:105313.

[65] LIU Xiangdong,LIU Haikuo,DU Changkun,et al. Distributed active vibration cooperative control for flexible structure with multiple autonomous substructure model[J]. Journal of vibration and control,2020,27:1-11.

[66] CHI W C,MA S J,SUN J Q. A hybrid multi-degree-of-freedom vibration isolation platform for spacecrafts by the linear active disturbance rejection control[J]. Applied mathematics and mechanics,2020,41(5):805-818.

[67] ZHU Qiao,YUE Junzhou,LIU Weiqun,et al. Active vibration control for piezoelectricity cantilever beam:An adaptive feedforward control method[J]. Smart materials and structures,2017,26(2):047003.

[68] ACHESON M J,BALAKRISHNA S. Effects of active sting damping on common research model data quality[C]//Proceedings of the 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Orlando:AIAA,2011.

[69] ZHOU Mengde,LIU Wei,TANG Linlin,et al. Multidimensional vibration suppression method with piezoelectric control for wind tunnel models[J]. Sensors,2019,19(18):3998.

[70] LIN Yufan,QIN Xuguo,YU Yi,et al. A warming structure for piezoelectric stack working in cryogenic temperature[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2020,37(5):713-725.

(编辑　李坤璐)